

Краевая фотолюминесценция при комнатной температуре монокристаллического кремния

© Е.Г. Гуле[¶], Э.Б. Каганович, И.М. Кизяк, Э.Г. Манойлов, С.В. Свечников

Институт физики полупроводников им. В.Е. Лашкарева Национальной академии наук Украины,
03028 Киев, Украина

(Получена 20 июля 2004 г. Принята к печати 9 сентября 2004 г.)

На структурах нано/монокремний, полученных импульсным лазерным осаждением пленки нанокристаллического кремния (*nc*-Si) на подложку из монокристаллического кремния (*c*-Si), наблюдали сигнал краевой фотолюминесценции *c*-Si с максимумом при ~ 1.09 эВ при комнатной температуре. Сигнал фотолюминесценции увеличивался при уменьшении как плотности поверхностных состояний на границе *nc*-Si/*c*-Si, так и рассеяния краевого излучения *c*-Si в пленке *nc*-Si.

1. Введение

Одним из направлений создания излучателей на кремнии является возврат к собственной люминесценции монокристаллического кремния (*c*-Si) [1–12]. В 2001 году появились сообщения о создании кремниевых светодиодов (СИД), излучающих в области зона-зонной рекомбинации с эффективностью преобразования энергии 1% при температурах, близких к комнатным. Результаты были объяснены оптимизацией выхода излучения и подавлением безызлучательной рекомбинации путем ограничения носителей в активной области [1,2]. Эти сведения об электролюминесценции (ЭЛ) Si-СИД возобновили интерес к исследованию краевой фотолюминесценции (ФЛ) *c*-Si [7–9]. При комнатной температуре значение внешнего квантового выхода ФЛ достигало 6.1% на текстурированной и пассивированной SiO₂-поверхности *c*-Si. Повышению вероятности излучательной рекомбинации (кроме уменьшения скорости поверхностной рекомбинации носителей заряда) способствовало формирование дислокационных структур, вводимых различными способами, пластической деформацией, имплантацией тяжелых ионов с последующим отжигом, плавлением поверхности лазерным излучением и др. [2]. С дислокациями связывают локальные поля, ограничивающие диффузию носителей заряда к безызлучательным центрам рекомбинации. В работе [8] была установлена корреляция между плотностью поверхностных состояний (*N*) на границе *c*-Si/SiO₂ и интенсивностью ФЛ с максимумом при 1.15 мкм. Для уменьшения значений *N* структуры отжигали в водороде, для их увеличения — подвергали γ -облучению.

В наших предыдущих работах [13,14] по изучению спектра электронных состояний структур нано/монокремний (*nc*-Si/*c*-Si) было показано, что плотности граничных электронных состояний на интерфейсе *nc*-Si/*c*-Si и ловушек неравновесных носителей заряда на этой границе могут быть снижены путем выбора режима нанесения и легирования металлами пленки *nc*-Si, осажденной на подложку *c*-Si. Возникла гипотеза, что в исследуемых нами структурах возможно наблю-

дение собственной краевой ФЛ *c*-Si. Вспомнили и о работе 1995 года [15], в которой при изучении ЭЛ структур с пористым кремнием (*por*-Si/*c*-Si) в контакте с электролитом наблюдали помимо других — полосу краевой ЭЛ *c*-Si с максимумом при 1.05 эВ (1.18 мкм) при комнатной температуре. Сказанное послужило основанием постановки работы, цель которой — выяснение возможности и условий проявления зона-зонной ФЛ *c*-Si при комнатной температуре в структурах *nc*-Si/*c*-Si, сформированных импульсным лазерным осаждением.

2. Методика эксперимента

В качестве материала подложки использовали пластины *p*-Si:B с ориентацией (100), сопротивлением 10 Ом·см. На них методом импульсного лазерного осаждения (ИЛО) формировали пленки нанокристаллического кремния (*nc*-Si), представляющие собой наноккомпозит, содержащий нанокристаллы (НК) кремния с размерами 1–5 нм в матрице SiO_{*x*} ($1 < x \leq 2$). Мишень, тот же *p*-Si, облучали излучением лазера YAG:Nd³⁺, работающего в режиме модулированной добротности (длина волны 1.06 мкм, энергия в импульсе 0.2 Дж, длительность импульса 10 нс, частота их повторения 25 Гц). Пленки типа I осаждали из прямого потока высокоэнергетических частиц эрозионного факела на подложку, удаленную от мишени по нормали на расстояние 30 мм, в атмосфере остаточного газа вакуумной камеры с добавлением кислорода, давление которого составляло 6.5 Па. Пленки типа II осаждали из обратного потока низкоэнергетических частиц эрозионного факела на подложку, расположенную в плоскости мишени, в атмосфере аргона при давлении ~ 13 Па. Некоторые пленки легировали в процессе их формирования металлами Au, In, Al, Fe, Er и др. [13,14]. Для сравнения осаждали пленки *nc*-Si и на другие подложки, например слюду, а также формировали структуру *por*-Si/*c*-Si селективным химическим травлением монокремния.

В работе использованы результаты наших предыдущих исследований структурных, оптических, фотолюминесцентных и электронных свойств этих пленок,

[¶] E-mail: dept_5@isp.kiev.ua

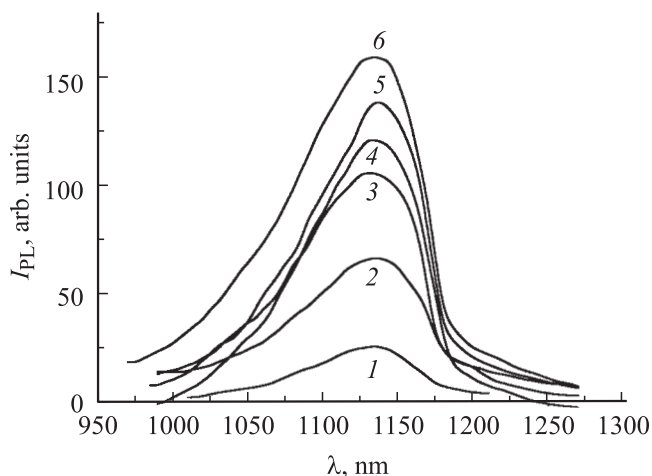
предпринятых для выяснения природы их ФЛ в видимой области спектра 1.4–3.0 эВ (см. [13,14] и ссылки к ним).

Спектры ФЛ измеряли при комнатной температуре в диапазоне энергий 0.9–1.3 эВ. Возбуждение осуществляли излучением аргонового лазера ЛГН-402 с длиной волны 514.5 нм и мощностью ~ 100 мВт. Использовали монохроматор МДР-23, спектральная ширина щели составляла ~ 40 Å. Фотоприемником служил охлаждаемый германиевый фотодиод ФД-315. Сигнал с фотодиода подавался на селективный усилитель и регистрировался методом синхронного детектирования.

3. Результаты и их обсуждение

ФЛ монокремния в области энергий 0.95–1.25 эВ (длин волн 1.3–1 мкм) обусловлена излучательными зона-зонными переходами носителей заряда, аннигиляцией свободных экситонов с участием фононов. Об участии фононов свидетельствуют горбы на спектральных кривых, различимые при температурах обычно более низких, чем комнатные, и при логарифмической шкале интенсивности ФЛ [7–9]. На исследуемых структурах *nc-Si/p-Si* помимо полос ФЛ в видимой области спектра 1.4–3.2 эВ наблюдали полосу с максимумом при 1.09 эВ. Измеренные спектры ФЛ в этой ближней ИК области спектра были аналогичны тем, что обычно приводят в литературе для линейной шкалы интенсивности краевой ФЛ *c-Si* и температуре 300 К [7] (см. рисунок). Этот сигнал ФЛ наблюдали не на всех образцах.

На структурах с пленками типа II, которые были осаждены из низкоэнергетического потока частиц эрозионного факела и характеризовались меньшей энергетической плотностью поверхностных состояний *N* на границе раздела *nc-Si/c-Si* [13,14], как правило, наблюдали сигнал краевой ФЛ *c-Si* с максимумом при 1.09 эВ. Легирование этих пленок металлами приводило к усилению



Спектры фотолюминесценции структур *nc-Si/c-Si* с пленками типа II: 1 — нелегированной, 2–6 — легированными: 2 — In, 3 — Er, 4 — Fe, 5 — Au, 6 — Al.

сигнала ФЛ, однако установить влияние типа примеси на интенсивность сигнала ФЛ не удалось. Форма спектра практически не зависела от типа легирующей примеси.

Сигнал краевой ФЛ *c-Si* не наблюдали в структурах с пленками типа I, которые были осаждены из высокоэнергетического потока частиц эрозионного факела и имели высокую плотность поверхностных состояний на границе раздела *nc-Si/c-Si* [13,14]. Сигнал ФЛ *c-Si* отсутствовал на исходных подложках *c-Si* с естественным окислом SiO_2 и значительной эффективностью безызлучательной рекомбинации. Отсюда следует, что для наблюдения краевой ФЛ в структурах *c-Si*, полученных ИЛО, необходимо осаждать пленки *nc-Si* из обратного потока частиц эрозионного факела и легировать металлами.

Краевая ФЛ *c-Si* может быть связана не только с подложкой *c-Si*, но и с крупными кремниевыми НК пленки. В *nc-Si* наряду с квантово-размерными НК из-за значительной дисперсии размеров присутствуют и крупные НК. Но как показали контрольные опыты, сигнал краевой ФЛ *c-Si* не наблюдается на всех пленках *nc-Si*, осажденных на слюде. Это свидетельствует в пользу того, что сигнал ФЛ действительно связан с подложкой *c-Si*.

Структуры *por-Si/c-Si* обнаруживали слабый сигнал краевой ФЛ. Это, очевидно, обусловлено рассеянием излучения на сильно развитой поверхности *por-Si*. Следует отметить, что пленки типа I, осажденные из прямого потока частиц, характеризуются большой дисперсией размеров НК. Поверхность их содержит кластеры с размерами в сотни нанометров с большим разбросом по высоте. В то же время пленки типа II характеризуются значительно большей однородностью, селекцией по размерам НК, гораздо большей однородностью рельефа. Меньшее рассеяние излучения в них также определяет увеличение сигнала ФЛ *c-Si*.

4. Заключение

Таким образом, в данной работе впервые на структурах нано/монокремний наблюдали сигнал краевой ФЛ *c-Si* при комнатной температуре. Показано, что при нанесении пленки *nc-Si* на подложку *c-Si* методом ИЛО возможно реализовать условия подавления безызлучательной рекомбинации на границе *nc-Si/c-Si* и уменьшить потери на рассеяние краевого излучения *c-Si* путем выбора режима нанесения и легированием металлами в процессе формирования пленки.

Список литературы

- [1] M.A. Green, J. Zhao, A. Wang, P.J. Reece, M. Gal. Nature, **412**, 805 (2001).
- [2] W.L. Ng, M.A. Lourenco, R.M. Gwillian, S. Ledain, A. Shao, K.P. Homewood. Nature, **410**, 192 (2001).

- [3] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Б.П. Захарченя, И.Н. Ясневич. *Матер. совет. „Нанопотоника“*, (Нижний Новгород, Россия, 2003) т. 1, с. 59.
- [4] J.M. Sun, T. Decorsy, W. Skorupa, B. Schmidt, M. Helm. *Appl. Phys. Lett.*, **83**, 3885 (2003).
- [5] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Т.М. Мельникова, S. Pizzini. *ФТП*, **37**, 756 (2003).
- [6] А.В. Саченко, А.П. Горбань, В.П. Костылев. *ФТП*, **38**, 570 (2004).
- [7] T. Trupke, J. Zhao, A. Wang, R. Corkish, M.A. Green. *Appl. Phys. Lett.*, **82**, 2996 (2003).
- [8] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, S. Pizzini. *ФТП*, **36**, 1307 (2002).
- [9] T. Trupke, M.A. Green, P. Würfel, P.P. Altermatt, A. Wang, J. Zhao, R. Corkish. *J. Appl. Phys.*, **94**, 4930 (2003).
- [10] А.М. Емельянов, Н.А. Соболев, Е.И. Шек. *ФТТ*, **46** (1), 44 (2004).
- [11] Н.А. Соболев, А.М. Емельянов, Е.И. Шек, В.И. Вдовин. *ФТТ*, **46** (1), 39 (2004).
- [12] М.С. Бреслер, О.Б. Гусев, Е.И. Торуков, A. Froitzheim, W. Fuhs. *ФТТ*, **46** (1), 18 (2004).
- [13] Э.Б. Каганович, И.М. Кизяк, С.И. Кириллова, Э.Г. Манойлов, В.Е. Примаченко, С.И. Свечников, Е.Ф. Венгер. *ФТП*, **36**, 1105 (2002).
- [14] E.B. Kaganovich, S.I. Kirillova, E.G. Manoilov, V.E. Primachenko, S.V. Svechnikov, E.F. Venger, I.R. Bazylyuk. *Semicond. Phys.: Quant. Electron. Optoelectron.*, **5**, 125 (2002).
- [15] Л.В. Беляев, Д.Н. Горячев, Д.И. Ковалев, Ф. Кох, В. Петрова-Кох, О.М. Сресели, И.Д. Ярошецкий. *ФТП*, 29 (7), 1288 (1995).

Редактор Т.А. Полянская

Edge photoluminescence of single crystalline silicon at room temperature

E.G. Gule, E.B. Kaganovich, I.M. Kiziak, E.G. Manoilov, S.V. Svechnikov

V.E. Lashkarev Institute of Semiconductor Physics,
National Academy of Science of Ukraine,
03028 Kiev, Ukraine

Abstract A signal of the edge photoluminescence from single-crystalline silicon (*c*-Si) with a peak maximum at ~ 1.09 eV at 300 K was observed on nano/monosilicon structures prepared by pulsed laser deposition of the Si nanocrystalline films on the Si monocrystalline substrates. It is shown that PL signal increases with decreasing both the density of surface states at the *nc*-Si/*c*-Si interface and the scattering of the edge radiation of *c*-Si in *nc*-Si films.